

Chemische analyse poriewater en waterbodem Grote- of  
Achterwaterschap en Hoge Boezem van de Overwaard: effecten van  
droogval



Eindrapport

Opdrachtgever: Royal Haskoning DHV

Projectnummer: PR 14.054 Rapportnummer: 2014.44 • Auteur: LvdB, MP

Datum: Januari 2015



# Chemische analyse poriewater en waterbodem Grote- of Achterwaterschap en Hoge Boezem van de Overwaard: effecten van droogval

Leon van den Berg, Moni Poelen



Niets uit dit rapport mag worden gereproduceerd, opnieuw vastgelegd, vermenigvuldigd of uitgegeven door middel van druk, fotokopie, microfilm, langs elektronische of elektromagnetische weg of op welke andere wijze dan ook zonder schriftelijke toestemming van de auteurs en de opdrachtgever. Het is voor de opdrachtgever wel toegestaan de inhoud van deze rapportage met bronvermelding, te gebruiken voor andere publicaties.

*Titel rapport:* Chemische analyse poriewater en waterbodem Grote- of Achterwaterschap en Hoge Boezem van de Overwaard: effecten van droogval

*Opdrachtgever:* Royal Haskoning DHV

*Rapportnummer:* 2014.14

Onderzoekcentrum B-WARE  
Radboud Universiteit Nijmegen  
Postbus 6558  
6525 ED Nijmegen  
Tel: 024-3652815  
l.vandenberg@b-ware.eu  
www.b-ware.eu

© Onderzoekcentrum B-WARE, Nijmegen, 2015.

# Inhoud

<b>1</b>	Inleiding.....	2
<b>1.1</b>	Inleiding .....	2
<b>1.2</b>	Knelpunten bij ontwikkeling moeras- en onderwatervegetatie.....	3
<b>2</b>	Methoden.....	6
<b>2.1</b>	Veldonderzoek.....	6
<b>2.2</b>	Droogvalexperiment.....	7
<b>3</b>	Resultaten .....	10
<b>3.1</b>	Veldmetingen .....	10
<b>3.2</b>	Droogvalexperiment.....	15
<b>4</b>	Discussie en conclusies.....	20
<b>4.1</b>	Conclusies .....	22
<b>5</b>	Literatuur.....	24
	 Bijlagen.....	 26

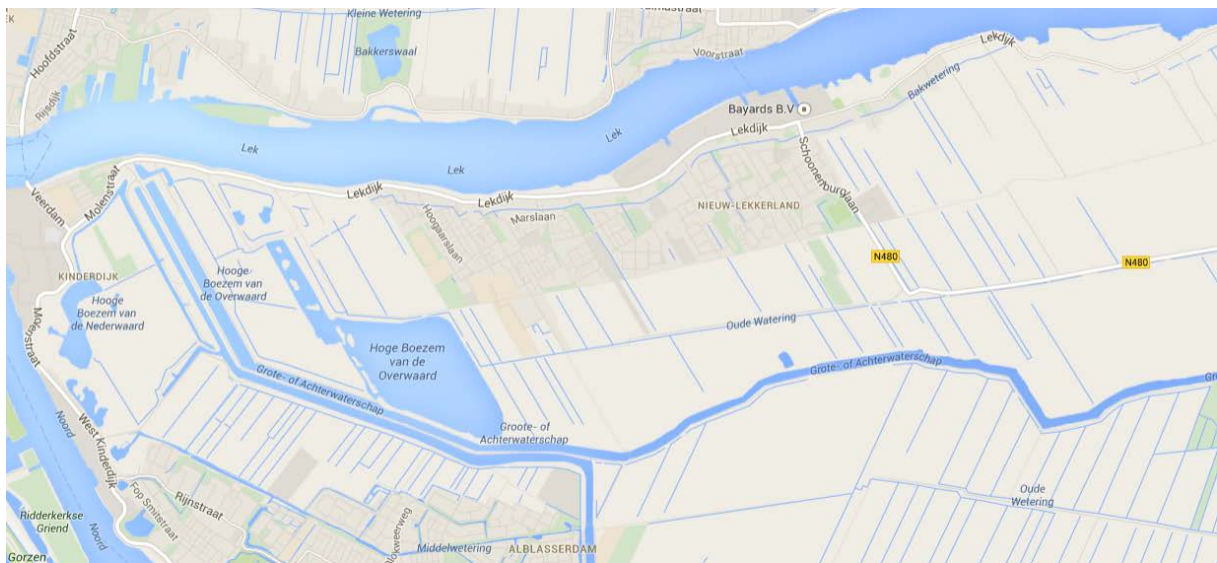


# 1 Inleiding

## 1.1 Inleiding

De KRW waterlichamen “het Grote- of Achterwaterschap” en “De Hoge Boezem van de Overwaard” (Figuur 1) zijn centraal gelegen in het Natura 2000-gebied “Boezems Kinderdijk” wat met ca. 332 ha verder de Hoge Boezems van de Nederwaard en Nieuw-Lekkerland, de Lage Boezems van de Neder- en Overwaard en delen van de aangrenzende polders Blokweer en Nieuw-Lekkerland omvat. Het gebied is een belangrijk broedgebied van soorten van de vogelrichtlijn. Voor het gebied gelden instandhoudingsdoelen en uitbreidingsdoelen voor met name broedende soorten van rietmoeras (purperreiger, snor), pioniermoeras (porseleinhoen) en open water/moerasvegetatie (zwarte stern) en niet-broedende, overwinterings- en foeragerende soorten (smient, krakeend en slobbeend).

In het ontwerpbeheerplan van het gebied (over de periode 2014-2019) worden voorstellen voor maatregelen gedaan ten behoeve van de realisatie van de instandhoudingsdoelstellingen van de Natura 2000-waarden (van den Broek 2014). Deze maatregelen zijn additionele maatregelen bovenop de kernmaatregelen voor het gebied en betreffen met name de broedvogels. Additionele maatregelen voor instandhoudingsdoelen voor niet-broedende vogels worden niet nodig geacht (van den Broek 2014).



**Figuur 1** Ligging van de wateren: Grote- of Achterwaterschap en Hoge Boezem van de Overwaard ten opzichte van de Lek en de Noord nabij Kinderdijk (bron Google maps).

De waterbodem in de Hoge Boezem van de Overwaard bestaat uit een dikke laag opwervend slib bovenop een veen/klei pakket. Het opwervend slib is een groot probleem voor de ontwikkeling van onderwatervegetatie (door o.a. gemakkelijke ontworteling, resuspensie en nalevering van nutriënten), tevens ondervinden vogels die op zicht jagen (bijvoorbeeld zwarte stern en purperreiger) nadeel van het slechte doorzicht. Naast het beperkte doorzicht zijn de steile kanten van de Hoge Boezem van de Overwaard en de lange strijkengte van de voornamelijk zuidwestelijke wind problematisch voor de ontwikkeling van rietmoeras en verlandings.

Waterschap Rivierenland is eigenaar van beide waterlichamen en is voornemens om, in het kader van de realisatie van instandhoudingsdoelen en de uitbreiding van moerashabitat, delen van de Hoge Boezem van de Overwaard te verondiepen en er natuurvriendelijke oevers en luwtestructuren aan te leggen. Het materiaal waarmee de Hoge Boezem van de Overwaard verondiept zal worden komt uit het Grote- of Achterwaterschap welke uitgediept gaat worden binnen de beheerplanperiode 2014 – 2019. Deze maatregelen moeten positief bijdragen aan de waterkwaliteit (door opwerveling van de slibdeeltjes tegen te gaan), de ontwikkeling en uitbreiding van onderwatervegetatie en moerasvegetatie (door verbetering doorzicht en scheppen van kieming en vestigingsplaatsen voor vegetatie) en de vis en vogelstand (door scheppen van gunstige abiotische en biotische condities). Met de verbetering van de ecologische waterkwaliteit wordt tevens invulling gegeven aan de KRW-doelen die gelden voor dit waterlichaam.

## **1.2 Knelpunten bij ontwikkeling moeras- en onderwatervegetatie**

De ontwikkeling van een goede onderwatervegetatie en moerasvegetatie wordt beperkt door de expositie, de hoeveelheid licht onder water, de kwaliteit van zowel het bodemsubstraat als de waterlaag, en het waterpeil.

Het is bekend dat de bodemkwaliteit (de chemische samenstelling van de bodem) een grote invloed heeft op de waterkwaliteit (zowel direct als indirect (Lamers et al. 1996, Poelen et al. 2012)). Een voedselrijke bodem kan bijvoorbeeld fosfaat (P) en stikstof (N) naleveren aan de waterlaag welke voor een explosieve groei van met name algen en blauwalgen kunnen zorgen (Jaarsma et al. 2008). Zeker in ondiepe delen kan explosieve (blauw)algenbloei ongunstige situaties creëren voor zowel vegetatie als fauna en stankoverlast voor de omgeving opleveren. Eerder onderzoek heeft aangetoond dat de nalevering van fosfaat uit de bodem sterk afhankelijk is van de mate waarin fosfor (en fosfaat) gebonden is aan bodem- en organische stofdeeltjes en metalen. Hierbij spelen de zuurstofhuishouding en de hoeveelheid ijzer en zwavel een belangrijke rol (zie voor een biogeochemische beschrijving van P-nalevering en de werking van ijzer-P val: Lamers et al. 2010, Poelen et al. 2012, van den Berg et al. 2012).

Gezien de ligging van de twee waterlichamen kan een grote invloed van oude mariene sedimenten worden verwacht met daarin vaak hoge zwavel (S) concentraties. Dit onderliggende materiaal is vaak chemisch sterk gereduceerd doordat het een zeer lange periode onder zuurstofloze/zuurstof arme condities is opgeslagen. Zwavel in gereduceerde vorm zoals bijvoorbeeld sulfide ( $H_2S$ ) is zeer toxisch voor planten en fauna en kan de ontwikkeling van moerasvegetatie en onderwatervegetatie ernstig belemmeren. Naast vorming van sulfide kan ophoping van ammonium in het bodemvocht ook toxisch zijn voor wortelende waterplanten. Bij de afbraak van organisch materiaal wordt ammonium gevormd, dat kan ophopen bij anaërobe omstandigheden en vanaf 100  $\mu\text{mol/l}$  toxisch is voor de meest kritische waterplanten (Lamers et al., 2010).

Voor de vorming van moeras en onderwatervegetatie is het daarom van groot belang eerst een goed beeld te krijgen van het substraat en onder welke omstandigheden dit substraat gebruikt kan worden, alvorens dit op grote schaal toe te passen. Als de bodem een forse hoeveelheid P en N levert aan de waterlaag kunnen onwenselijke situaties ontstaan. Als de wortelgroei door een tekort aan zuurstof en/of de ophoping van giftige stoffen geremd wordt, zal moerasontwikkeling achterblijven. Dit is bekend van het grootschalig gebruik van slib voor de ontwikkeling van natuurvriendelijke oevers in Nederland.

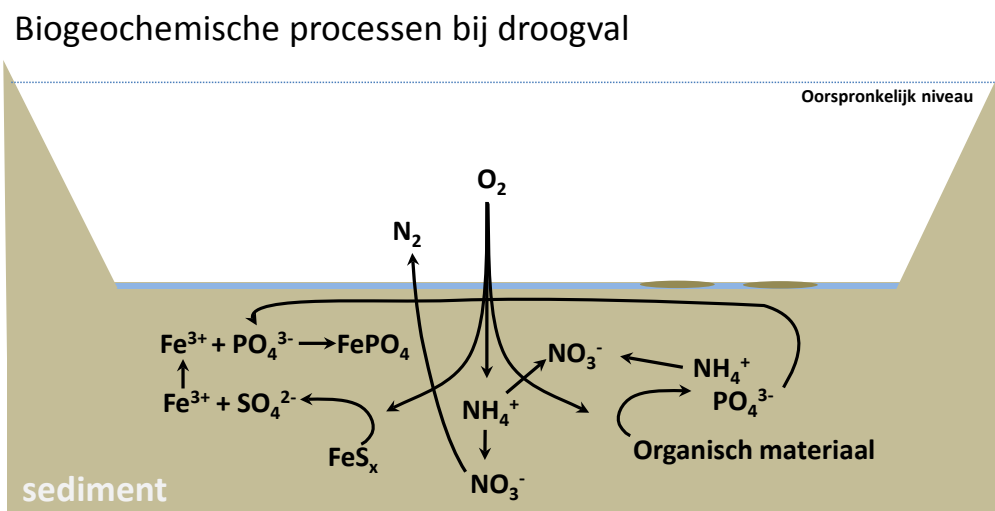


In het recente STOWA onderzoekprogramma “Tijdelijke droogval als waterkwaliteitsmaatregel” zijn de effecten van langere perioden van droogval op de waterkwaliteit en bodemchemie onderzocht (Westendorp et al. 2012). Hieruit bleek dat tijdelijke droogval via verschillende processen positief kan ingrijpen op het functioneren van een watersysteem. De belangrijkste positieve effecten van tijdelijke droogval op de fysisch-chemische waterkwaliteit betreffen:

- Binding van fosfaat
- Stikstofverwijdering
- Consolidatie van de waterbodem
- Omzetting toxische stoffen

### Biogeochemische processen bij droogval/plas-dras situatie

De meeste waterbodems zijn zuurstofarm omdat de consumptie van zuurstof tijdens afbraakprocessen veel groter is dan de aanvoer van zuurstof door diffusie. Tijdens de tijdelijke droogvalperiode echter, kan zuurstof ( $O_2$ ) de bodem indringen omdat de diffusie barrière die door het oppervlaktewater wordt gevormd afwezig is. De aanwezigheid van zuurstof in de waterbodem brengt verschillende processen op gang (Figuur 2).



**Figuur 2** De belangrijkste biogeochemische processen die plaatsvinden bij tijdelijke droogval van een onderwaterbodem.

De verhoging van het zuurstofgehalte in de bodem zorgt voor de omzetting van ijzersulfiden naar ijzer(3)hydroxiden en sulfaat (zie Figuur 2). Het driewaardig ijzer dat hierbij ontstaat (de ijzer(3)hydroxiden) kan met fosfaat ( $PO_4^{3-}$ ) reageren en neerslaan als ijzerfosfaat. Naast de oxidatie van ijzersulfide zal zuurstof ook leiden tot de oxidatie van gereduceerde S verbindingen als  $H_2S$  tot sulfaat waardoor deze toxische verbindingen niet meer vrij beschikbaar zijn. De neerslag van ijzerfosfaat betekend een immobilisatie van fosfaat en een verlaging van de concentratie vrij ijzer (wat ook toxisch kan zijn voor biota).

Naast een omzetting van ijzersulfiden wordt ook de nitrificatie (de omzetting van ammonium ( $NH_4^+$ ) naar nitraat ( $NO_3^-$ )) gestimuleerd door het aanwezige zuurstof. Omdat nitraat vaak mobiel is (zich niet hecht aan bodemdeeltjes) zal het uitzakken naar diepere anaerobe lagen waar het

gedenitrificeerd wordt tot stikstofgas ( $N_2$ ) en vervolgens verdwijnt naar de atmosfeer (Figuur 2). Naast de chemische reacties zal een concentratie van slibdeeltjes plaatsvinden en zal de onderwaterbodem consolideren als gevolg van tijdelijke droogval.

Dat een dergelijke periode van droogval of een plas-dras situatie ook daadwerkelijk gunstig is voor de moerasontwikkeling is onder meer aangetoond in het onderzoeksprogramma "PeatCap" in het Volgermeer. In experimenten in veldsituatie werd aangetoond dat moerasvorming zeer snel en succesvol was op locaties waarbij het waterpeil variabel op plas-dras niveau, werd gehouden, in tegenstelling tot locaties waarbij een vast en hoger waterpeil werd aangehouden (Foto 1). Dit had te maken met de voor moerasplanten gunstige condities in de plas-dras situatie zoals de toevoer van zuurstof en licht in combinatie met het lage waterpeil. Nadat de vegetatieontwikkeling voldoende was gestart, kon het waterpeil langzaam verhoogd worden. Dit betekent dus dat het waterpeil van doorslaggevende betekenis is bij de ontwikkeling van moerassen.



**Foto 1:** Moerasvorming in het Volgermeer na 6 maanden, links de controle situatie waarbij een vast waterpeil (0.4 m) werd aangehouden, rechts de situatie waarbij een plas/dras situatie werd aangehouden (foto Leon Lamers).

De belangrijkste positieve effecten van tijdelijke droogval op de vegetatieontwikkeling betreffen:

- het ontstaan van kieming- en vestigingsplaatsen
- het toenemen van de klonale groei van diverse planten met snelle groei tot gevolg
- toename van biodiversiteit (Van Geest et al. 2005)

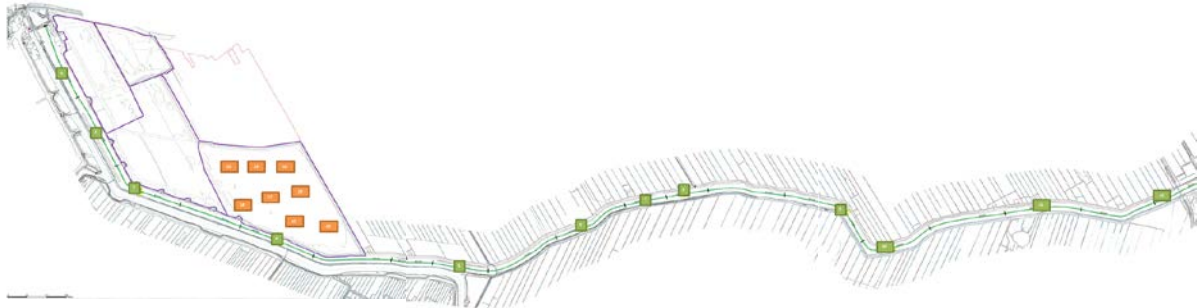
Droogval van veenbodem en klei-houdende bodem zal dus biogeochemische effecten teweegbrengen. Deze worden gevolgd door mogelijke effecten op biota (macrofauna en flora). Het bodemmateriaal uit het Grote- of Achterwaterschap bestaat voornamelijk uit veen (waarnemingen B-Ware en metingen RHDHV). Het is voor een succesvolle uitvoer van de voorgestelde maatregelen van belang dat inzicht wordt verkregen in de biogeochemische gevolgen van het opbrengen van dit materiaal in de Hoge Boezem van de Overwaard. Daarnaast wordt het wenselijk geacht om inzicht te krijgen in de gevolgen van droogval van dit materiaal, en dan met name met betrekking tot de biogeochemische omzettingen in het sediment.

Deze studie heeft als doel de bodemkwaliteit van de bodems van het Grote- of Achterwaterschap en de Hoge Boezem van de Overwaard in kaart te brengen met het oog op de voorgenomen maatregelen. Hierbij zijn de effecten van tijdelijke droogval op de bodemchemie en waterkwaliteit experimenteel onderzocht.

## 2 Methoden

### 2.1 Veldonderzoek

In juli 2014 werden op 20 locaties bodemon monsters genomen in het Grote- of Achterwaterschap en de Hoge Boezem van de Overwaard (Figuur 3).



**Figuur 3** Locaties van de monsterpunten. In groen de monsterpunten in het Grote- of Achterwaterschap en in oranje de monsterpunten in de Hoge Boezem van de Overwaard

De locaties van de monsterpunten werd gekozen aan de hand van de onderliggende bodem (veen of klei) welke aangegeven was op beschikbare bodemkaarten. Alle locaties zijn met behulp van een GPS (Garmin 60 CX) vastgelegd, het bodemprofiel is beschreven en de diepte van het water is genoteerd.

Op elke locatie is met behulp van een multi-sampler (6 centimeter diameter) bodemmateriaal verzameld voor de analyse van totaalgehalten en fysische parameters van de bodem. Per locatie zijn hiervoor 5 submonsters, afkomstig van de bovenste 5-10 centimeter van de onderwaterbodem, genomen die gezamenlijk 1 mengmonster vormen. Tevens zijn op elke locatie 5 submonsters genomen voor de collectie van bodemvocht. Bodems en water zijn gekoeld getransporteerd. Van de waterbodemon monsters is dezelfde dag, na handmatige anaërobe homogenisatie en onder gekoelde omstandigheden, anaëroob bodemvocht verzameld met behulp van teflon rhizons (Eijkelkamp Agrisearch) en vacuüm 60 ml spuiten. Bij terugkomst is de concentratie waterstofsulfide in het bodemvocht gemeten en de rest van het watermonster is bewaard bij 4°C voor verdere analyse. Tevens is op elke locatie in het Grote- of Achterwaterschap materiaal verzameld voor het droogval experiment (zie droogval experiment).

Van het verzamelde bodemvocht werd voor iedere locatie 9,5 ml bodemvocht gefixeerd met Sulfide Anti Oxidant Buffer (SAOB) om oxidatie van sulfide te voorkomen. De sulfideconcentratie werd dezelfde dag gemeten met een Orion sulfide elektrode en een Consort ionmeter (type P914). De alkaliniteit werd bepaald middels een titratie met verdund zoutzuur tot pH 4,2 en de pH werd gemeten met een standaard Ag/AgCl<sub>2</sub> elektrode verbonden met een radiometer (Copenhagen, type PHM 82).

Vochtgehalte werd bepaald van het verse bodemmateriaal na 48 uur drogen bij een temperatuur van 60°C. Organische stof gehalte werd bepaald na verassen (4 uur) bij een temperatuur van 550°C. Totaal gehalten van de mineralen in de bodem werden bepaald na destructie van 0,2 gram gedroogde en gemalen bodem met 4 ml salpeterzuur en 1 ml waterstofperoxide.

Een sequentiële P-fractionering (Golterman 1996) is uitgevoerd met 5 gram verse bodem om te bepalen aan welke bodemfractie het fosfor gebonden is. In deze sequentiële fractionering werd het bodem met de extractiebuffer gecentrifugeerd met een Sorvall centrifuge (13000 rpm). Achtereenvolgens zijn gebruikt:  $\text{NH}_4\text{Cl}$  (1M),  $\text{Ca-EDTA}$  (0,05M),  $\text{Na-EDTA}$  (0,1M).

De concentraties calcium (Ca), magnesium (Mg), aluminium (Al), ijzer (Fe), mangaan (Mn), fosfor (P), zwavel (S) als maat voor sulfaat, silicium (Si) en zink (Zn) werden bepaald met behulp van een Inductively Coupled Plasma Spectrofotometer (ICP Thermo Electron corporation IRIS Intrepid II XDL). De concentraties nitraat ( $\text{NO}_3^-$ ) en ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) werden colorimetrisch bepaald met een Braun en Luebbe auto-analyzer II met behulp van resp. salicylaatreagens en hydrazinesulfaat. Chloride ( $\text{Cl}^-$ ) en fosfaat ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) werden colorimetrisch bepaald met een Technicon auto-analyzer II systeem met behulp van resp. mercuritiocyanide, en ammoniummolybdaat en ascorbinezuur. Natrium ( $\text{Na}^+$ ) en kalium ( $\text{K}^+$ ) werden vlamfotometrisch bepaald met een Technicon Flame Photometer IV Control.

## 2.2 Droogvalexperiment

In het Grote- of Achterwaterschap is op alle monsterlocaties bodemmateriaal verzameld voor het droogval experiment. Dit materiaal werd verdeeld in twee typen: een veen type en een klei/veen type. Van beide typen is ruim 20 L materiaal verzameld en getransporteerd naar het laboratorium. Binnen 24 uur na aankomst is het materiaal, na zorgvuldig homogeniseren, verdeeld over 16 aquaria van 12,5 x 25 cm (zie Foto 2), resulterend in 2 L bodem per aquarium



**Foto 2** Overzicht van het droogvalexperiment. 16 aquaria zijn gevuld met twee bodem typen uit het Grote of Achterwaterschap: a) veen en b) klei-veen.

Aan de helft van de aquaria is 3L medium toegevoegd, dat wat betreft zwavel en alkaliniteit vergelijkbaar is met de veldsituatie ( $1000\mu\text{mol/L SO}_4^{2-}$ ,  $3000\mu\text{mol/L HCO}_3^-$ ). De andere helft van de aquaria werd droog gehouden voor de droogval. Om het droogvallen te bespoedigen (klei en veen houden veel water vast) zijn deze ook drooggetrokken door bodemvocht te onttrekken. Het experiment wordt uitgevoerd in het donker bij 15 °C om algen en plantengroei te voorkomen. De drooggevallene aquaria werden in de 5e week aangevuld met 3 L water (hetzelfde water als alle andere aquaria) waardoor een vergelijking van nalevering mogelijk werd tussen de niet drooggevallene en drooggevallene bodems.

Na het aanvullen van de aquaria zijn Rhizon bodemvochtmonsteraars (rhizons, 10cm) aangebracht ten behoeve van het bemonsteren van het bodemvocht in de bovenste laag van de bodem en van de waterlaag (Foto 3). Hierbij werd één rhizon op 1 centimeter in de bodem en één in de waterlaag, vijf centimeter boven de bodem geplaatst (Foto 4). Een dag na aanvullen van het water is het experiment gestart en is week 0 bemonsterd (deze bemonstering is door de verstoring van het bodemmateriaal niet meegenomen in de verdere analyse). De waterlaag is in totaal zeven keer bemonsterd (in de niet-droogval aquaria), het bodemvocht vier keer (zie tabel 1).

**Tabel 1** Bemonsteringschema voor droogval experiment. Op T=4 werd water opgezet in de aquaria die in de eerste 4 weken droog zijn gevallen (aangegeven met blauwe kleur).

	T0	T1	T2	T4	T5	T7	T8
<b>Oppervlakte water</b>	x	x	x	x	x	x	x
<b>Bodemvocht</b>	x	x		x			x

Na de bemonstering werd het volume in de cilinders op peil gebracht door het water aan te vullen met dezelfde hoeveelheid van de betreffende behandeling. Om het effect van verdamping te compenseren is er tussentijds met demiwater aangevuld tot oorspronkelijk niveau.



**Foto 3** Close-up van twee aquaria met links (nr13) een klei/veenbodem waarboven water staat en rechts (nr14) een veenbodem tijdens droogval.

Van de water en bodemvochtmonsters zijn pH, alkaliniteit en hoeveelheid nutriënten (zie veldexperiment) bepaald met behulp van ICP en autoanalysers. De naleveringssnelheden van P en N (ammonium plus nitraat) naar de waterlaag werden bepaald door regressie van het lineaire gedeelte van de concentratiestijgingen in de waterlaag. Ook bij hoge naleveringssnelheden bleek deze nalevering lineair te verlopen, waarmee correctie voor een verandering van de diffusieweerstand niet nodig bleek te zijn. Bij de berekeningen werd gecorrigeerd voor de bemonsterde volumina.



**Foto 4 Links:** Zijaanzicht van aquarium met klei/veen mengsel met daarop 3 L water. Er zijn per aquarium 2 rhizons aangesloten voor bodemvocht- en watermonsternamen: een in de bodem en een in de waterlaag. De rhizon voor de waterlaag is hier te zien. **Rechts:** Bovenanzicht van droogval aquarium met een duidelijke veenbodem.

## 3 Resultaten

### 3.1 Veldmetingen

Op de meeste locaties (behalve op locatie 1 en 2, zie ook Figuur 3) bevindt er zich slechts een dunne sliblaag in het Grote- of Achterwaterschap (Tabel 2). In de Hoge Boezem van de Overwaard (locaties 13 t/m 20) is een dikke sliblaag aanwezig.

**Tabel 2** Coördinaten (centrale X en Y coördinaat van de bemonsterlocaties), slibdikte en pH, sulfide en alkaliniteit van het bodemvocht van de locaties in het Grote- of Achterwaterschap (locatie 1 t/m 12) en de Hoge Boezem van de Overwaard (locatie 13 t/m 20)

locatie	X	Y	slibdikte	ondergrond	pH	Sulfide	alkaliniteit
			cm			μmol/L	meq/L
1	103526	433390	20	veen met klei	7.2	2.0	7.5
2	103750	432991	20	veen	7.0	4.1	4.7
3	104030	432559	10	veen en klei	7.0	8.7	4.9
4	104892	432245	2-5	klei en veen	7.2	11.1	4.0
5	105460	432118	2	veen	7.1	10.3	3.8
6	106539	432317	2-3	veen	7.2	8.7	4.7
7	106959	432510	0-1	klei	7.1	5.8	4.7
8	107409	432568	2	veen en klei	7.1	7.4	4.3
9	108221	432410	2	veen	7.1	11.1	5.2
10	108589	432282	2	veen	7.3	9.4	4.0
11	109306	432415	3	veen	7.2	8.7	4.4
12	110233	432554	3	veen	7.6	6.8	4.0
13	104538	432711	110	vast slib en veen	7.5	3.2	5.1
14	104936	432770	130	vast slib en veen	7.4	3.5	5.0
15	105033	432758	130	vast slib en veen	7.4	3.8	4.8
16	104728	432399	100	vast slib en veen	7.2	5.3	5.7
17	104958	432612	150	vast slib en veen	7.4	2.7	5.1
18	105185	432502	140	vast slib en veen	7.6	1.1	4.0
19	104914	432323	100	vast slib en klei	7.3	4.5	5.9
20	105054	432349	130	vast slib en veen	7.3	6.3	6.0

Op enkele locaties in het Grote- of Achterwaterschap (locatie 4,5,9,10) bevinden zich verhoogde sulfide concentraties (ongeveer 10 μmol/L). Een verband tussen sulfide concentratie en alkaliniteit (als maat voor de afbraak) is niet zichtbaar ( $R^2 = 0.19$ ).

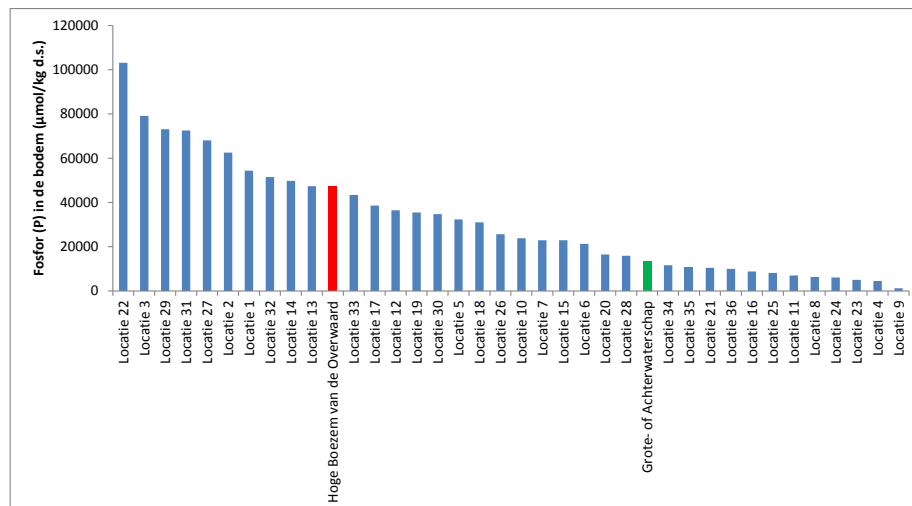
Fosfor metingen in het sediment van het Grote- of Achterwaterschap laten zien dat de gemiddelde fosforconcentraties gemiddeld tot laag zijn voor Nederlandse begrippen (Tabel 4 en Figuur 4). De gehalten in de hoge Boezem van de Overwaard zijn daarentegen veel hoger en ook voor Nederlandse begrippen redelijk hoog (Figuur 4).

**Tabel 3** Nutriëntenconcentraties in het bodemvocht (gemiddelden) in  $\mu\text{mol/L}$  en P (Olsen extract) in  $\text{mmol/L}$  verse bodem voor locaties in het Grote- of Achterwaterschap (locatie 1 t/m 12) en de Hoge Boezem van de Overwaard (locatie 13 t/m 20)

locatie	$\text{NO}_3^-$	$\text{NH}_4^+$	$\text{PO}_4^{3-}$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{Cl}^-$	P (Olsen extract)
1	0.7	1729.0	35.8	1859.3	184.1	2042.4	0.11
2	0.5	490.8	53.9	1813.6	167.1	1976.2	0.07
3	1.5	616.8	25.0	1729.1	164.7	1890.4	0.06
4	1.1	194.7	44.5	1772.2	166.1	2051.8	0.11
5	0.5	202.7	44.9	1759.8	166.0	2033.6	0.08
6	0.3	210.5	72.8	1743.1	187.1	1911.1	0.04
7	0.3	276.5	53.9	1788.7	183.0	2020.7	0.19
8	0.3	156.9	20.0	1715.3	153.5	1978.4	0.16
9	0.4	477.1	55.0	1723.2	173.8	1888.6	0.09
10	0.4	202.3	45.9	1883.6	176.7	2141.6	0.03
11	0.4	90.3	54.7	1876.9	167.5	2111.2	0.08
12	0.5	208.8	46.1	1683.0	204.3	1903.3	0.19
13	0.2	170.5	134.3	2066.3	199.2	2360.7	0.36
14	0.3	179.8	123.7	2040.8	207.4	2276.4	0.49
15	0.3	435.1	185.9	2093.9	193.3	2349.5	0.53
16	0.8	437.4	139.1	1967.4	235.6	2182.3	0.59
17	0.4	242.9	144.2	2032.2	220.7	2271.5	0.40
18	0.4	147.8	118.1	2022.5	180.5	2287.3	0.62
19	0.4	414.9	167.0	2004.1	231.4	2200.2	0.46
20	0.5	385.6	95.4	1809.6	236.7	2023.1	0.39

Ammonium concentraties in het bodemvocht variëren sterk van zeer hoog op locatie 1 tot laag op locatie 11. Mogelijk is de hoge ammoniumconcentratie op locatie 1 te verklaren door de aanwezigheid van veel recreatie en de dikke sliblaag (denk aan eenden voeren en afval dumpen). De alkaliniteit van het bodemvocht is hier ook erg hoog, zeker in vergelijking met de rest van het Grote- of Achterwaterschap wat duidt op verhoogde afbraak van organisch materiaal. Fosfaat en het beschikbare P (Olsen extracten) zijn duidelijk gemiddeld hoger in de Hoge Boezem van de Overwaard ten opzichte van het Grote- of Achterwaterschap (Tabel 3) en volgen de trend van totaal P (Tabel 4).





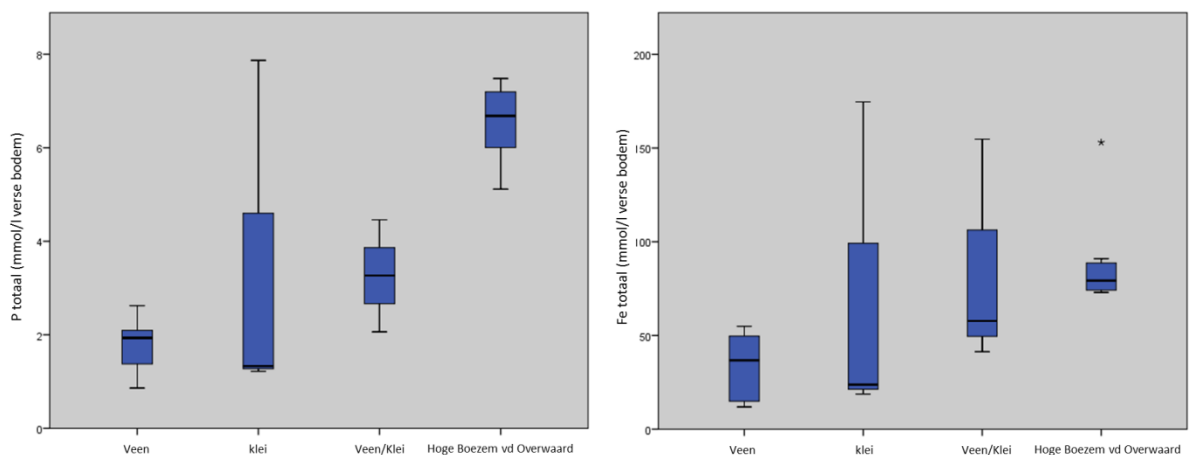
**Figuur 4** Totaal P gehalte in het sediment van het Grote- of Achterwaterschap (in groen) en de Hoge Boezem van de Overwaard (in rood) in relatie tot 36 willekeurige andere Nederlandse wateren (data uit STOWA Baggernut programma, Poelen et al 2012).

IJzer kan fosfor binden en de ratio (in mol:mol) tussen Fe en P wordt vaak indicatief gezien voor de mogelijke ijzerbindingsplaatsen van fosfor. Uit Tabel 4 blijkt dat deze ratio zeer gunstig is maar ook te zien is dat de zwavel concentraties erg hoog zijn. Metingen in het bodemvocht laten inderdaad zien dat de Fe/P ratio in het bodemvocht ongunstig is (Bijlage 1,  $Fe/P < 1$ ) In een gereduceerde bodem (zuurstofarm) zal zwavel (S) binden aan Fe. Hierdoor is ijzer niet meer beschikbaar voor binding aan fosfaat. De metingen aan het bodemvocht tonen dat dit ook hier het geval is. De ratio  $(Fe-S)/P$  geeft indicatief aan hoeveel ijzerbindingsplaatsen nog beschikbaar zijn als de binding tussen Fe en S maximaal is. Deze ratio is voor alle bemonsterde locaties op een na (locatie 8) negatief wat aangeeft dat bij maximale reductie en maximale binding tussen S en Fe er geen fosfaten worden geïmmobiliseerd. Dit houdt in dat er een sterke mobilisatie van fosfor mogelijk is vanuit het slib naar de waterlaag (nalevering (Poelen et al. 2012)) onder zuurstofarme omstandigheden.

**Tabel 4** Nutriëntenconcentraties in de bodem (totalen na destructie) in mmol/kg d.s. voor locaties in het Grote- of Achterwaterschap (locatie 1 t/m 12) en de Hoge Boezem van de Overwaard (locatie 13 t/m 20). Ratios Fe/P en (Fe-S)/P zijn op mol:mol basis. In bijlage II zijn de gegevens tevens weergegeven in mmol/l verse bodem.

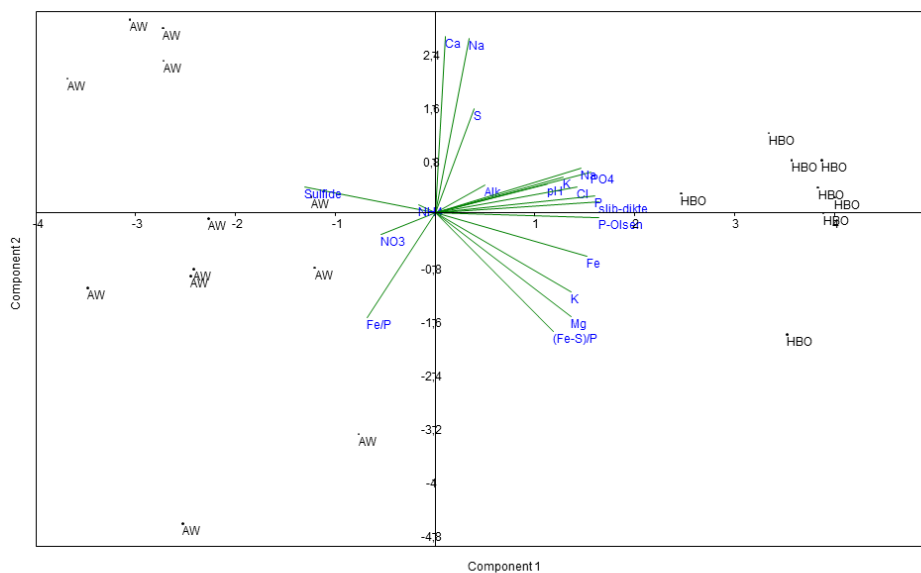
Locatie	Ca	Fe	K	Mg	Na	P	S	Fe/P	(Fe-S)/P
1	495.7	303.5	56.5	129.9	18.0	13.6	828.1	22.3	-38.6
2	471.3	410.1	45.4	115.8	17.4	13.8	1066.6	29.7	-47.6
3	474.1	372.8	45.5	129.8	15.7	13.3	794.3	28.0	-31.7
4	491.0	286.5	59.4	157.4	15.9	15.1	626.5	18.9	-22.5
5	509.0	196.4	64.6	151.4	17.2	14.8	408.7	13.2	-14.3
6	750.9	218.1	29.9	98.9	22.5	12.2	853.2	17.9	-52.1
7	292.2	546.6	82.0	236.9	12.1	15.8	757.2	34.7	-13.4
8	168.6	291.1	42.1	199.5	6.3	13.1	136.6	22.2	11.8
9	687.9	165.1	16.9	80.4	19.6	10.7	795.7	15.4	-58.7
10	677.7	111.6	12.3	78.3	22.6	8.1	751.1	13.8	-79.0
11	869.6	112.6	16.8	84.0	20.8	10.4	653.3	10.9	-52.2
12	545.6	223.5	68.8	154.9	14.9	17.7	458.1	12.6	-13.3
13	575.7	614.7	89.7	221.8	20.0	44.3	861.6	13.9	-5.6
14	608.3	622.0	67.5	205.0	20.8	63.5	762.4	9.8	-2.2
15	519.0	552.0	81.6	201.2	19.3	48.1	689.7	11.5	-2.9
16	627.1	637.4	81.5	218.4	21.7	58.0	862.3	11.0	-3.9
17	466.1	620.9	87.9	238.6	12.7	29.7	562.5	20.9	2.0
18	557.0	574.3	75.1	205.6	18.6	54.2	715.7	10.6	-2.6
19	749.9	610.3	72.1	201.8	19.3	41.1	901.9	14.8	-7.1
20	584.2	669.3	88.5	220.7	21.1	39.7	992.7	16.9	-8.2

Er werden geen significante verschillen gemeten in bodemconcentraties van nutriënten en mineralen tussen de verschillende monsterpunten in het Grote of Achterwaterschap. Wel werden er significante verschillen gevonden voor de P concentraties van de monsterpunten in het Grote of Achterwaterschap en die van de Hoge boezem van de Overwaard ( $p=0,000$ ;  $df=3$ ;  $F=11,47$ , figuur 5a) en de ijzerconcentratie van de veenlocaties in het Grote of Achterwaterschap en die van de Hoge boezem van de Overwaard ( $p=0,001$ ;  $df=1$ ;  $F=18,18$ , figuur 5b).



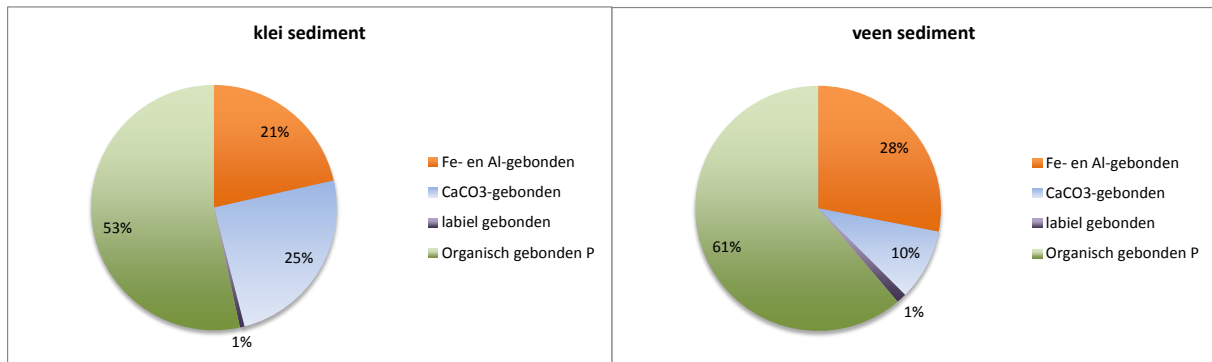
**Figuur 5** Totaal P gehalte (a, links) en totaal Fe gehalte (b, rechts) in de bodem het Grote- of Achterwaterschap (veen, klei of klei/veen) en de Hoge Boezem van de Overwaard in mmol/L verse bodem.

Uit een PCA blijkt duidelijk dat de bodems van het Grote- of Achterwaterschap en de Hoge Boezem van de Overwaard duidelijk van elkaar verschillen. De verschillen zitten met name in het slibgehalte, P, Fe en mineralen (K, Mg, Na) gehalten welke hoog zijn in de Hoge Boezem en laag zijn in het Grote- of Achterwaterschap. Daarnaast zijn sulfide gehalten hoger in het Grote- of Achterwaterschap.



**Figuur 6** PCA met bodemgegevens van het Grote- of Achterwaterschap (AW) en de Hoge Boezem van de Overwaard (HBO).

Een organische fractionering is uitgevoerd op de mengmonsters van het Grote- of Achterwaterschap waarbij onderscheid is gemaakt in veen monsters en kleimonsters (idem aan de sedimenten die gebruikt zijn voor het droogval experiment). Figuur 7 laat de relatieve P-bezetting aan de verschillende fracties zien.

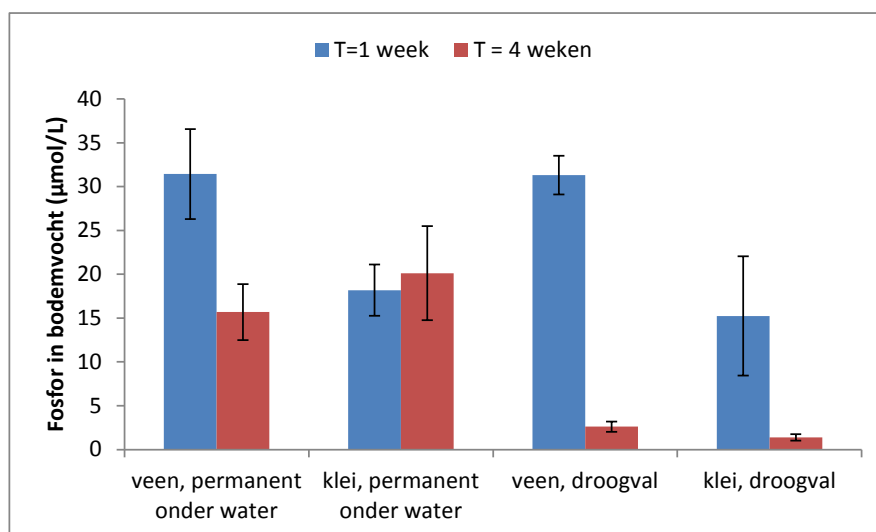


**Figuur 7** Percentages van de verschillende fracties gebonden P (ijzer/calcium/labiel en organisch) van het totaal aan P in de bodems van het Grote- of Achterwaterschap (klei links, veen rechts).

De P-fractionering toont dat de meeste P in de bodem is gebonden aan organische stof en daarna een fors deel is gebonden aan ijzer en calcium. Organische P kan redelijk makkelijk mobiliseren bij afbraak van organisch materiaal.

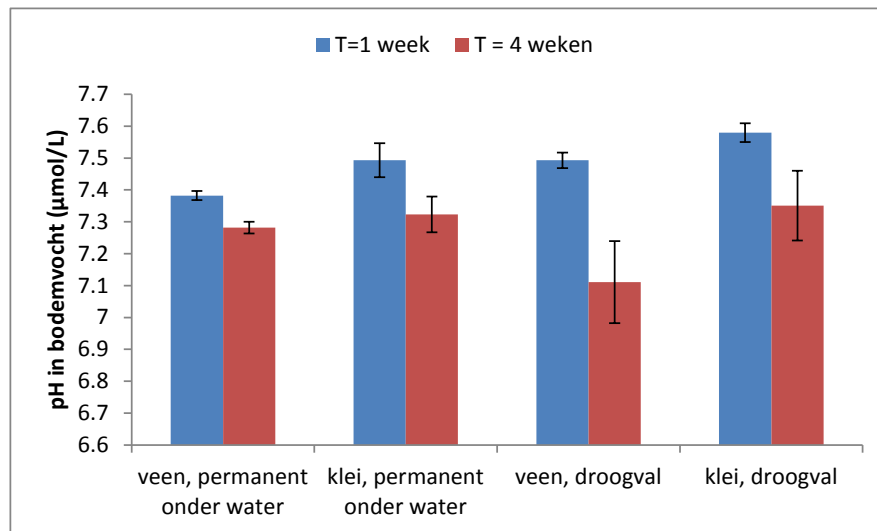
### 3.2 Droogval experiment

De metingen van het bodemvocht gedurende de eerste 4 weken van het experiment tonen duidelijk het effect van droogval van de twee bodems. Figuur 8 toont een significante afname gedurende de eerste 4 weken van de P concentratie in het bodemvocht in het veen voor zowel de bodems die permanent onder water stonden als de bodems die droogvielen. In de kleibodems zien we alleen bij droogval een significante afname van het P gehalte na 4 weken (zie figuur 8 en bijlage III).



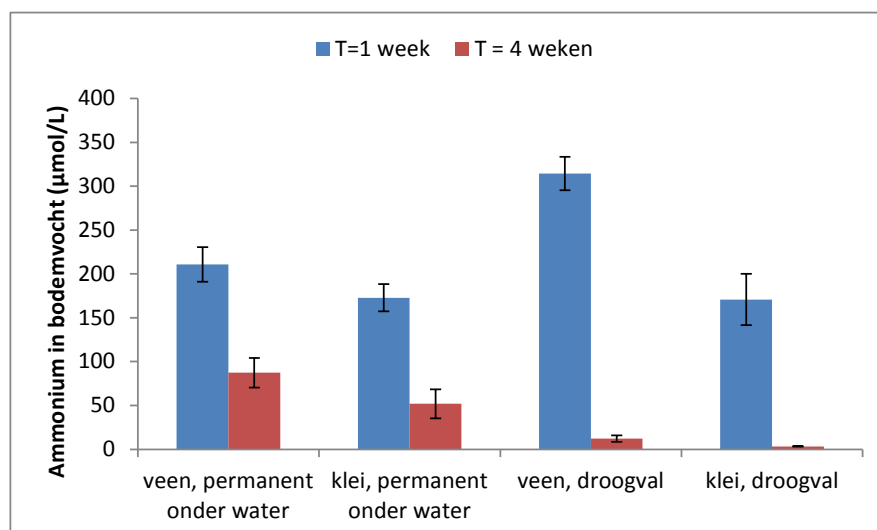
**Figuur 8** Totaal P gehalte in het bodemvocht op T=1 (het begin van de droogval periode in blauw) en op T=4 (het eind van de droogval periode in rood) in de aquaria met veen en klei substraat.

In alle aquaria (droogval en onderwater) werd een afname in de pH gemeten in het bodemvocht na 4 weken (Figuur 9). In de veenbodems was deze pH daling het sterkst tijdens de droogval. De pH daling voor het kleisediment bleek niet significant te verschillen tussen droogval en onderwater. Kleibodems hadden een hogere pH dan veenbodems onder verder vergelijkbare omstandigheden (Figuur 9).



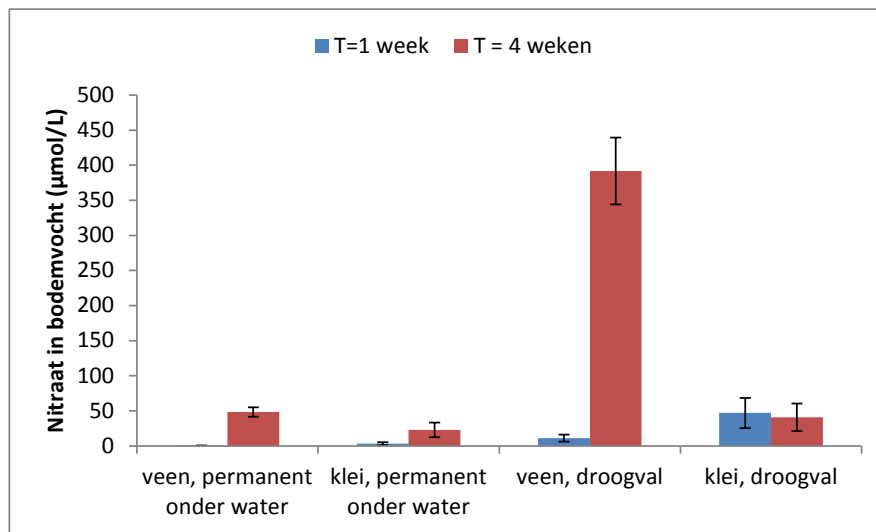
**Figuur 9** pH in het bodemvocht op T =1 (het begin van de droogval periode **in blauw**) en op T = 4 (het eind van de droogval periode **in rood**) in de aquaria met veen en klei substraat.

Na 4 weken bleken ook de ammoniumconcentraties in alle aquaria significant af te nemen van maximaal 314  $\mu\text{mol/l}$  naar ongeveer 3  $\mu\text{mol/l}$  (Figuur 10). Deze afname was significant sterker in de aquaria die droogvielen.



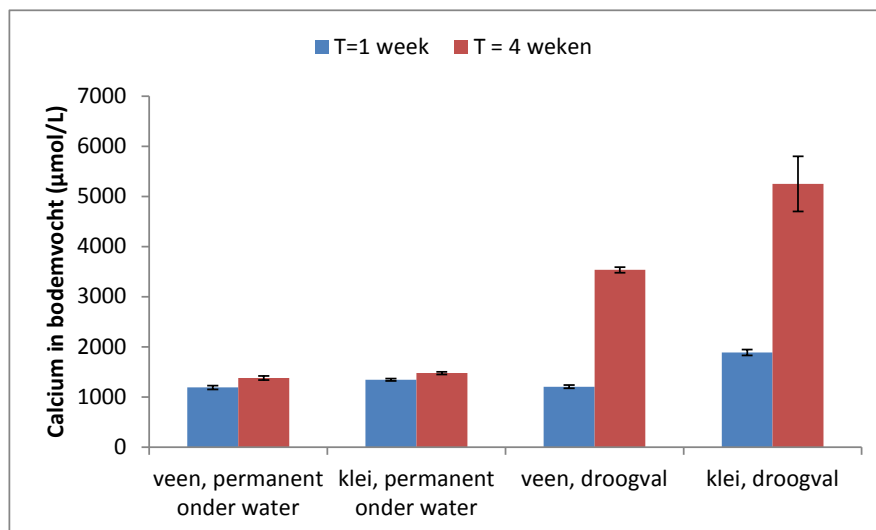
**Figuur 10** Ammonium in het bodemvocht op T =1 (het begin van de droogval periode **in blauw**) en op T = 4 (het eind van de droogval periode **in rood**) in de aquaria met veen en klei substraat.

Nitraatconcentraties bleken licht te stijgen in de bodems die onder water stonden (Figuur 11). In de veenbodems die droogvielen bleek de  $\text{NO}_3^-$  stijging het hoogst van 11  $\mu\text{mol/l}$  naar ongeveer 390  $\mu\text{mol/l}$  (Figuur 11). Een toename in de drooggevalen kleibodems werd niet waargenomen.



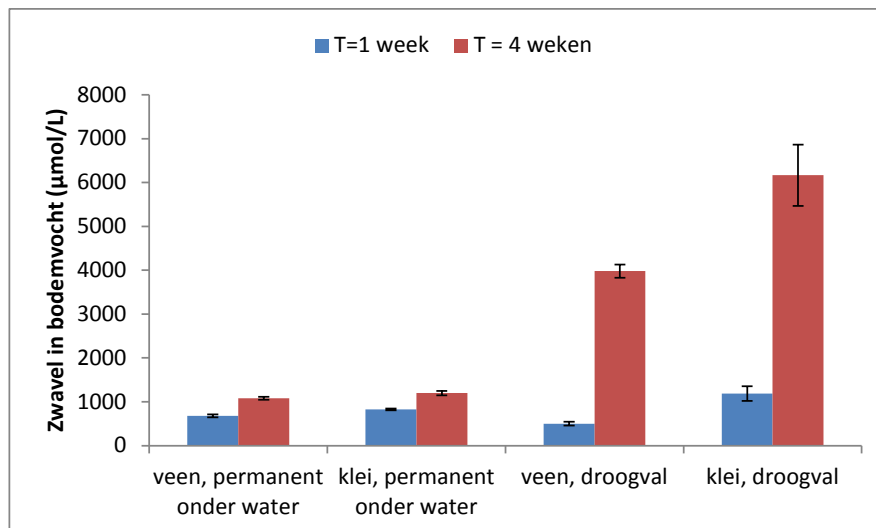
**Figuur 11** Nitraat in het bodemvocht op T=1 (het begin van de droogval periode **in blauw**) en op T=4 (het eind van de droogval periode **in rood**) in de aquaria met veen en klei substraat.

Droogval had een sterk significant effect op de calciumconcentraties in het bodemvocht (Figuur 12) met een duidelijke stijging in de drooggevalen bodems na 4 weken. Deze stijging was hoger in de kleisubstraten.



**Figuur 12** Calcium in het bodemvocht op T=1 (het begin van de droogval periode **in blauw**) en op T=4 (het eind van de droogval periode **in rood**) in de aquaria met veen en klei substraat.

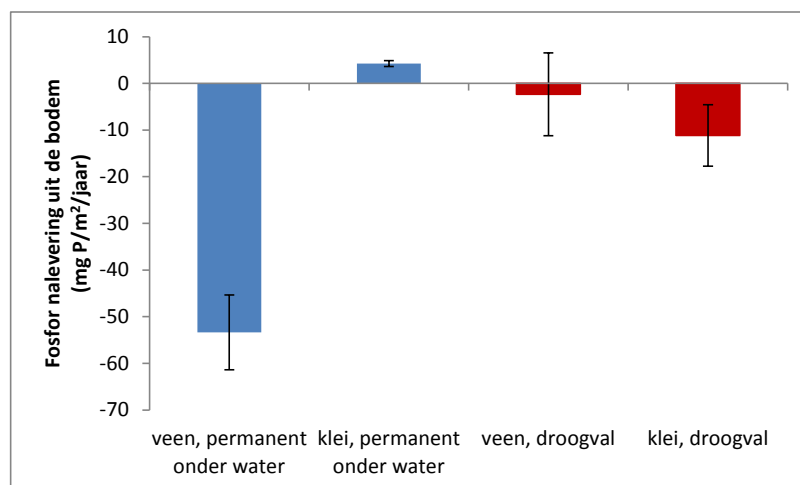
Droogval had tevens een vergelijkbaar effect op de zwavelconcentraties in het bodemvocht (Figuur 13) met een duidelijke stijging in de drooggevalen bodems na 4 weken.



**Figuur 13** Zwavel in het bodemvocht op T=1 (het begin van de droogval periode **in blauw**) en op T = 4 (het eind van de droogval periode **in rood**) in de aquaria met veen en klei substraat.

### P Nalevering

Fosfornalevering uit de bodems zonder droogval was gemiddeld  $-53 \text{ mgP/m}^2/\text{jaar}$  voor veen bodems en  $4.3 \text{ mgP/m}^2/\text{jaar}$  voor veen-klei bodems (Figuur 14). Deze zeer lage nalevering in de kleiige bodems en de immobilisatie (negatieve nalevering) in veenbodems verklaren de zeer lage concentraties P in het bovenstaande water. In de aquaria met drooggevallen bodems kon de nalevering worden bepaald na het opzetten van water (week 5 t/m week 8). De nalevering van P na droogval was voor beide bodems negatief, hetgeen immobilisatie van P betekent (Figuur 14). In de bijlage IV is de data opgenomen die de basis vormt voor deze grafiek.



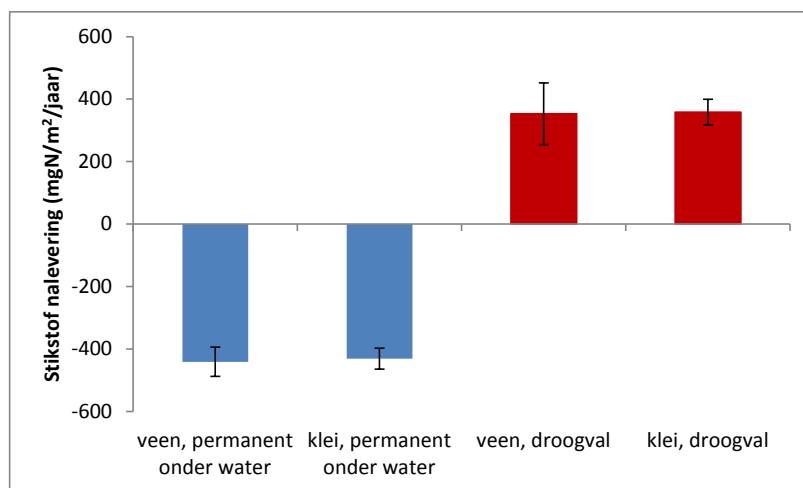
**Figuur 14** P nalevering gemeten over de periode T=1 t/m T=8 in  $\text{mgP/m}^2/\text{jaar}$  voor de sedimenten die **niet zijn drooggevallen** (in blauw) en P nalevering gemeten over de periode T=5 t/m T=8 in  $\text{mgP/m}^2/\text{jaar}$  voor de sedimenten die **zijn drooggevallen** (in rood).

Het water in de aquaria werd gedurende het experiment zichtbaar helderder (neerslag organische partikels) maar de turbiditeit van het water is niet gemeten.

## N Nalevering

Stikstofnalevering uit de bodems zonder droogval was gemiddeld  $-436 \text{ mgN/m}^2/\text{jaar}$  voor veen en klei bodems (niet significant verschillend, Figuur 15). Deze immobilisatie (negatieve nalevering) in de bodems verklaren de zeer lage concentraties N in het bovenstaande water. In de aquaria met drooggevallen bodems werd N gemobiliseerd (te zien in Figuur 15 in de rode balken) **na het opzetten van water**. Deze mobilisatie over 4 weken is waarschijnlijk zeer tijdelijk van aard want deze bestaat voor 100% uit  $\text{NO}_3^-$  mobilisatie gevormd door oxidatie van  $\text{NH}_4^+$  gedurende de droogval (oxidatieve) periode.  $\text{NH}_4^+$  bleek in deze aquaria nagenoeg verdwenen na droogval (hier werd een netto immobilisatie gemeten).

De nalevering van stikstof is sterk gecorreleerd aan die van P (Zie ook Poelen et al 2012) en aangenomen mag worden dat  $\text{NO}_3^-$  mobilisatie dat plaatsvindt na droogval van slechts tijdelijke aard is (piek). Na opname van  $\text{NO}_3^-$  door planten en algen of het uitspoelen via doorstroom zal N mobilisatie eerder het patroon van P mobilisatie volgen. In het droogval experiment zijn geen hoge  $\text{NH}_4^+$  pieken waargenomen (geen hoge  $\text{NH}_4^+$ -mobilisatie), in tegenstelling tot de veldmetingen. Dit heeft zeer waarschijnlijk te maken met de temperatuur van de experimentele opstelling ( $15^\circ\text{C}$ ) waarbij hoge afbraaksnelheden en ammoniumvorming niet plaatsvinden.



**Figuur 15** N nalevering gemeten over de periode  $T=1$  t/m  $T=8$  in  $\text{mgN/m}^2/\text{jaar}$  voor de sedimenten die **niet zijn drooggevallen** (in blauw) en N nalevering gemeten over de periode  $T=5$  t/m  $T=8$  in  $\text{mgN/m}^2/\text{jaar}$  voor de sedimenten die **zijn drooggevallen** (in rood) LET OP: N-nalevering na droogval is tijdelijk en bestaat uit nitraatpieken van nitraat dat gevormd is tijdens de oxidatie van ammonium gedurende de droogvalperiode.



## 4 Discussie en conclusies

Deze studie had als doel de bodemkwaliteit van het grote of Achterwaterschap en de Hoge boezem van de Overwaard in kaart te brengen met uitgebreide chemische analyses. Hierbij werd met name gelet op de aanwezigheid van nutriënten en de potentie van mobilisatie/immobilisatie ervan.

Uit de veldgegevens bleek dat de nutriënt- en mineraalgehalten van de monsterlocaties in het grote of Achterwaterschap niet veel van elkaar verschillen. Er bleek ook weinig organisch slib aanwezig op de bodem van het waterlichaam, behalve op de plekken met veel recreatie (met name nabij het gemaal). Het grootste deel van de bodem van het grote of Achterwaterschap bestaat uit veen en weinig materiaal. Slechts op enkele plekken zit klei aan het oppervlak, al is het vaak vermengd met weinig materiaal. Het gebruik van dit veen om de hoge boezem van de Overwaard te verondiepen heeft goede biologische potenties omdat het relatief arm is aan P en veelal intact weinig materiaal betreft met weinig afgebroken organisch slib. Wel moet worden opgemerkt dat het ammoniumgehalte relatief hoog was op de meeste locaties in het Grote of Achterwaterschap en al helemaal bij het monsterpunt bij het gemaal waardoor bij het gebruik van dit materiaal toch enige biologische verzuivering mag worden verwacht. Het gebruik het bodemmateriaal van deze locatie bij het gemaal wordt dan ook niet aangeraden.

Zwavelconcentraties van de bodems in het Grote of Achterwaterschap zijn relatief hoog en het inbrengen van zwavel in een systeem met relatief hoge P gehalten kan leiden tot verhoogde afbraak en een mobilisatie van het zwak-gebonden P. De zwavelconcentraties van de Hoge boezem van de Overwaard zijn echter ook erg hoog en vergelijkbaar met die van het Grote of Achterwaterschap. Het gebruik van materiaal uit het Grote of Achterwaterschap zal daardoor naar verwachting niet bijdragen aan een verhoging van de concentraties S en daarmee wordt extra P-mobilisatie ook niet verwacht als gevolg van deze toepassing.

De aanwezigheid van sulfiden in het bodemvocht van het Grote of Achterwaterschap duidt op gereduceerde condities waarbij sulfiden en ook ammonium ontstaan. Dergelijke condities kunnen resulteren in het achteruitgaan van vegetatie of het achterwege blijven van succesvolle ontwikkeling van helofyten en ondergedoken waterplanten. Sterk gereduceerde omstandigheden kunnen ook ontstaan in de Hoge boezem van de Overwaard, met name omdat daar het doorzicht in het water gering is. Bij weinig doorzicht groeien weinig planten en algen en is derhalve de fotosynthese en dus zuurstofproductie laag, zeker op bodem niveau. Onder deze omstandigheden zal de afbraak, met name in warmere perioden, zorgen voor sterk gereduceerde omstandigheden met mogelijk toxische sulfide en ammonium pieken. De veldmetingen uit dit onderzoek werden uitgevoerd in een warme periode in juli. Met name in de nazomer, als makkelijk afbreekbaar organisch materiaal zich heeft gevormd en als de temperaturen nog hoog zijn zullen sulfide en ammoniumconcentraties in luwte zones toenemen. Anderzijds draagt het grote oppervlak van het open water van de hoge Boezem van de Overwaard bij aan de golfslagontwikkeling en daarmee de hoge mate van menging van de verschillende waterlagen. Het diepere zuurstofarme water wordt daardoor gemengd met zuurstofrijker water uit hogere delen. Deze menging zorgt voor een verbeterde zuurstofbeschikbaarheid aan de bodem en heeft daarmee een positief effect op de *chemische* waterkwaliteit voor wat betreft aanwezigheid van toxische concentraties ammonium en sulfiden.

De menging zorgt echter ook voor een enorme vertroebeling van het water wat resulteert in een zeer slechte *fysische* en *biologische* kwaliteit. Het achterwege blijven van een gezonde gemeenschap ondergedoken waterplanten in de Hoge boezem van de Overwaard moet voor het grootste deel worden toegeschreven aan het geringe doorzicht.

Het huidige onderzoek is niet toereikend voor het stellen van harde conclusies over een negatieve ontwikkeling van waterplanten en fauna door sulfiden en ammonium in warme periode. Hiervoor zullen meerdere metingen gedurende de warme perioden van de zomer en nazomer gekoppeld aan redox of zuurstofmetingen moeten plaatsvinden. Het aanbrengen van luwtestructuren om werveling van deeltjes tegen te gaan zal leiden tot een verbetering van het toezicht maar kan tegelijkertijd dus ook resulteren in verhoogde gehalten  $S^{2-}$  en  $NH_4^+$  (in ondiep water!), waardoor planten alsnog niet gaan groeien.

## Droogval

Zoals verwacht resulteerde droogval van de bodems in een verzuring van de bodem als gevolg van oxidatieprocessen. De veenbodem bleek hierbij het meest te verzuren. Deze bodem bleek ook een iets lagere buffering te hebben. De verzuring leidde tot het ontbinden van calciumcarbonaten waardoor Ca concentraties hoger werden in het bodemvocht. De FeS oxidatie resulteerde in een toename van S in het bodemvocht. Dergelijke processen zijn reeds eerder gedocumenteerd en lagen dan ook in de lijn der verwachting (Lucassen et al. 2002, Westendorp et al. 2012). De relatief hoge buffering (hoge alkaliniteit) van de bodem heeft hierbij gezorgd voor een relatief geringe pH daling (van maximaal 0,3 pH eenheid) als gevolg van deze oxidatieprocessen. Negatieve effecten van droogval door verzuring voor leefomstandigheden van macrofauna en vegetatie worden bij deze bodem dan ook niet verwacht.

De oxidatie van  $NH_4^+$  dat ruim aanwezig was resulteerde in een sterke toename van  $NO_3^-$  en een afname van  $NH_4^+$ . Het geproduceerde  $NO_3^-$  zal in een veldsituatie wegzakken naar diepere (anaerobe) waterlagen en daarbij voor een groot deel gedenitrificeerd worden tot  $N_2$  gas. Naast de verwijdering van N uit het systeem bleek ook dat P door droogval in grote mate werd vastgelegd. Dit was een rechtstreeks gevolg van de oxidatie van FeS (en de vorming van  $Fe^{3+}$ ) waarna Fe-P verbindingen zijn neergeslagen ( $Fe^{3+}$  en  $PO_4^{3-}$ ) zoals ook al bekend uit eerder onderzoek (Smolders et al. 2004).

De metingen van de bodems na droogval tonen dat bij een kortstondige droogval deze bodems beter geschikt zijn voor vegetatieontwikkeling. De N-verwijdering en P-immobilisatie is gunstig voor de ecologische waterkwaliteit omdat een lage nutriëntbeschikbaarheid doorgaans positief is voor de biodiversiteit, terwijl de mogelijk toxische concentraties ammonium en sulfide (waarvoor met name kiemplanten gevoelig zijn) uitblijven. Daarnaast geeft de droogval ook een fysische positieve stimulans doordat het kiemingsplekken en vestigingsplekken biedt.

Uit eerder onderzoek is gebleken dat het P gehalte in het bodemvocht een goede indicatie geeft van de P nalevering naar de waterlaag (Poelen et al. 2012). Op basis van deze relaties kan men een forse nalevering verwachten uit slib van de Hoge boezem van de Overwaard (gemiddelde P gehalte 162  $\mu\text{mol/L}$ , Tabel B2). De nalevering die men hierbij verwacht is hoger dan 3  $\text{mgP/m}^2/\text{dag}$ . In het Grote- of Achterwaterschap mag men op grond van het gemiddelde P gehalte (55  $\mu\text{mol/L}$ , Tabel B2) een lagere nalevering van ongeveer 0,9  $\text{mg P/m}^2/\text{dag}$  verwachten. De werkelijke nalevering van de bodems uit het Grote- of Achterwaterschap is echter veel lager. Uit de aquaria die niet droogvallen blijkt dat de werkelijke nalevering van P uit sediment uit het Grote- of Achterwaterschap zelfs vaak negatief is, hetgeen betekent dat er P wordt geïmmobiliseerd. Dit is te verklaren door sterke binding van P aan organische partikels. Dit blijkt ook uit het feit dat deze immobilisatie met name in de veenbodems te zien is en uit het feit dat het grootste deel van het aanwezige P aan organische fracties is gebonden. De naleveringsexperimenten werden uitgevoerd bij uitgevoerd in het donker bij 15 °C. Deze condities in combinatie met de relatief korte duur van het experiment zorgen voor slechts een lage mate van afbraak van organisch materiaal door bacteriën. De organisch gebonden P fractie is echter een fractie die makkelijk vrij kan komen als deze afbraak toeneemt. Onder hogere temperaturen is ook uit deze veenbodem wel degelijk een lichte P mobilisatie te verwachten (van den Berg et al. 2012) van tussen de 0,3 (bij lage temperaturen) en 2  $\text{mg P/m}^2/\text{dag}$  (bij 25 °C). Als de waterlaag volledig anaëroob wordt kunnen deze naleveringssnelheden mogelijk nog sterker

toenemen. Voor N nalevering wordt door Poelen et al (2012) een correlatie met P nalevering gegeven voor bodems met een P nalevering  $>1\text{mg P/m}^2/\text{dag}$ :  $y = 0.0123x^2 + 0.6099x + 1.8185$ . Voor bodems met een P nalevering  $<1\text{mg P/m}^2/\text{dag}$  werd geen vergelijking gevonden. Deze vergelijking leert ons dat we een N-nalevering tussen 0 en 3,1 mg N/m<sup>2</sup>/dag

De nalevering na droogval was ook uit de kleibodems negatief (immobilisatie). Hieruit blijkt dat ook het aanwezige ijzer een rol speelt in de immobilisatie van P. Immobilisatie van dit P is reversibel en ook, vergelijkbaar met de organische-P fractie, dit P kan weer gemobiliseerd worden. In het geval van Fe-P bindingen wordt P gemobiliseerd bij lage redox potentiaal, dus wanneer de bodem anaeroob wordt. Het is dus van belang dat na droogval een voldoende waterkwaliteit (doorzicht) en bodemkwaliteit ontstaan, zodat helofyten en ondergedoken vegetatie kunnen zorgen voor voldoende zuurstofaanvoer (door fotosynthese en aeratie van de rhizosfeer) waardoor zuurstofbeschikbaarheid in de bodem hoog blijft.

#### 4.1 Conclusies

-De bodem in het Grote- of Achterwaterschap heeft lage P concentraties en het meeste van dit P zit gebonden aan organische stof. Deze bodems leveren weinig P na (immobilisatie zelfs) en ook N nalevering zal gering zijn (behalve op plekken waar hoge temperaturen en veel organische stof aanwezig is, zie opmerkingen ammonium).

-De bodem van de Hoge boezem van de Overwaard is P rijk en heeft de potentie om onder anaerobe omstandigheden veel P na te leveren.

-Zowel de bodems van het Grote- of Achterwaterschap als de Hoge boezem van de Overwaard zijn zwavel en stikstofrijk en zullen onder anaerobe condities sulfiden en ammoniak/ammonium produceren.

-Droogval van de bodem van het Grote- of Achterwaterschap zal positief werken op de bodemvochtkwaliteit en waterkwaliteit in de hoge Boezem van de Overwaard omdat:

- a) de hoge  $\text{NH}_4^+$  concentraties (mogelijk toxisch) dalen en N uit het systeem verwijderd wordt
- b) P immobiliseert (negatieve nalevering)
- c) toxische sulfiden oxideren
- d) het doorzicht verbeterd door consolidatie
- e) kieming en vestigingsplekken voor helofyten worden gegenereerd

## Kantttekeningen

- Als bodem met een hogere dichtheid (zeker de klei/veen locaties) wordt aangebracht op het 'dunne' slib, zakt dit er doorheen, waardoor het dunne nutriëntrijke slib vrij snel weer bovenop komt te liggen. Hiervoor dient men te waken bij een eventuele aanleg. Ook is het niet ongebruikelijk dat tijdens de aanleg een forse hoeveelheid (mobiel/dun) slib in suspensie raakt en wordt afgezet boven de nieuw aangebrachte laag. Studies waarbij Onderzoekcentrum B-ware betrokken is laten dit ook zien in bijvoorbeeld de Kralingse plas en de Bergse Achterplas (Geurts et al. 2013, Schep and Klinge 2013).
- De waterkwaliteit in de hoge boezem bepaald voor een deel wat er gebeurt met de bodem van het Grote of Achterwaterschap. Er is nu geen slibvorming in het Grote of Achterwaterschap maar het aanbrengen van dit materiaal in water met een hoge alkaliniteit of sulfaatconcentratie kan resulteren in het versneld afbreken van het veenmateriaal en slibvorming (Lamers et al. 2002, Poelen et al. 2012).

## 5 Literatuur

- Geurts, J., L. Lamers, M. Poelen, L. van den Berg, and A. Smolders. 2013. Nutriënten-beschikbaarheid van de onderwaterbodem van de Kralingse Plas in verband met problemen door cyanobacteriën. Onderzoekcentrum B-Ware, Nijmegen.
- Golterman, H. L. 1996. Fractionation of sediment phosphate with chelating compounds: A simplification, and comparison with other methods. *Hydrobiologia* **335**:87-95.
- Jaarsma, N., M. Klinge, L. Lamers, and B. J. van Weeren. 2008. Van helder naar troebel... en weer terug : een ecologische systeemanalyse en diagnose van ondiepe meren en plassen voor de kaderrichtlijn water. STOWA, Utrecht.
- Lamers, L., J. Sarneel, J. Geurts, M. Dioniso Pires, E. Remke, H. Van Kleef, M. Christianen, L. Bakker, G. Mulderij, J. Schouwenaars, M. Klinge, N. Jaarsma, S. van der Wielen, M. Soons, J. Verhoeven, B. Ibelings, E. van Donk, W. Verberk, H. Esselink, and J. Roelofs. 2010. Onderzoek ten behoeve van het herstel en beheer van Nederlandse laagveenwateren. Eindrapportage 2006-2009 (fase2). Ministerie van LNV, directie IFZ, 's Gravenhage
- Lamers, L. P. M., S. J. Falla, E. M. Samborska, I. A. R. van Dulken, G. van Hengsttum, and J. G. M. Roelofs. 2002. Factors controlling the extent of eutrophication and toxicity in sulfate-polluted freshwater wetlands. *Limnol.Oceanogr.* **47**:585-593.
- Lamers, L. P. M., A. J. P. Smolders, E. Brouwer, and J. G. M. Roelofs. 1996. Sulfaatverrijkt water als inlaatwater? *Landschap* **13/3**:169-180.
- Lucassen, E. C. H. E., J. van de Crommenacker, R. Peters, and J. G. M. Roelofs. 2002. Anti-verdrogingsmaatregelen en vegetatieherstel in Elzenbroekbossen. Het belang van een natuurlijk waterregime. *Natuurhistorisch maandblad* **91**:37-41.
- Poelen, M. D. M., L. J. L. van den Berg, G. N. J. ter Heerdt, R. Bakkum, A. J. P. Smolders, N. G. Jaarsma, R. J. Brederveld, and L. P. M. Lamers. 2012. WaterBODEMbeheer in Nederland: Maatregelen Baggeren en nutriënten (BAGGERNUT) – Metingen Interne Nutriëntenmobilisatie en Decompositie (MIND-BAGGERNUT) Eindrapportage 2012. B-Ware Research Centre, Nijmegen.
- Schep, S. and M. Klinge. 2013. 'De punten op de i': nadere systeemanalyse en optimalisatie waterkwaliteit Kralingse Plas. Witteveen + Bos
- Smolders, A. J. P., L. P. M. Lamers, M. Moonen, K. Zwaga, and J. G. M. Roelofs. 2004. Controlling phosphate release from phosphate-enriched sediments by adding various iron compounds. *Biogeochemistry*:219-228.
- van den Berg, L. J. L., M. D. M. Poelen, N. G. Jaarsma, and L. P. M. Lamers. 2012. WaterBODEMbeheer in Nederland: Maatregelen Baggeren en Nutriënten (BAGGERNUT) - Resultaten experimenten RUN en B-Ware. Radboud University Nijmegen, Nijmegen.
- van den Broek, A. J. M. 2014. Ontwerpbeheerplan bijzondere natuurwaarden Boezems Kinderdijk; Beheerperiode 2014-2019. Royal Haskoning DHV.
- Van Geest, G. J., H. Wolters, F. Roozen, H. Coops, R. M. M. Roijackers, A. D. Buijse, and M. Scheffer. 2005. Water-level fluctuations affect macrophyte richness in floodplain lakes. *Hydrobiologia* **539**:239-248.
- Westendorp, P., R. Loeb, G. Roskam, E. C. H. E. T. Lucassen, M. Thannhouser, F. Ebbens, H. Hut, and A. J. P. Smolders. 2012. Tijdelijke droogval als waterkwaliteitsmaatregel. Amersfoort.



## Bijlagen

**Bijlage I** Nutriëntenconcentraties in het bodemvocht (gemiddelden) in  $\mu\text{mol/L}$  voor locaties in het Grote- of Achterwaterschap (locatie 1 t/m 12) en de Hoge Boezem van de Overwaard (locatie 13 t/m 20)

locatie	Ca	Fe	Mg	P	S
1	2219.6	16.7	527.2	42.2	60.5
2	1596.3	0.7	408.9	64.4	66.3
3	1644.2	21.1	391.0	34.0	79.1
4	1573.9	0.6	385.5	44.5	172.2
5	1490.8	0.4	360.1	44.9	135.4
6	1747.3	0.4	408.9	86.4	80.1
7	1711.1	0.7	405.1	58.4	92.4
8	1606.0	42.7	357.2	40.4	38.1
9	1804.6	3.8	425.1	96.4	50.1
10	1527.7	0.2	381.8	45.9	84.9
11	1690.9	2.1	406.5	61.7	196.2
12	1721.1	0.4	396.3	49.0	276.8
13	1834.6	33.4	467.9	174.6	57.1
14	1899.7	17.3	465.8	139.3	79.9
15	1794.7	19.9	470.0	220.7	67.5
16	2065.6	29.7	485.6	167.0	119.8
17	1925.9	29.1	466.7	167.9	100.2
18	1600.8	25.2	423.5	137.0	228.7
19	2124.3	17.2	516.9	199.8	50.5
20	2146.0	2.3	495.5	95.6	129.4

**Bijlage II** Nutriëntenconcentraties in de bodem (totalen, gemiddeld) in mmol/L verse bodem voor locaties in het Grote- of Achterwaterschap (locatie 1 t/m 12) en de Hoge Boezem van de Overwaard (locatie 13 t/m 20)

Locatie	Ca	Fe	K	Mg	Na	P
1.0	76.4	46.8	8.7	20.0	2.8	2.1
2.0	63.1	54.9	6.1	15.5	2.3	1.8
3.0	73.5	57.8	7.1	20.1	2.4	2.1
4.0	85.1	49.7	10.3	27.3	2.8	2.6
5.0	69.5	26.8	8.8	20.7	2.3	2.0
6.0	81.9	23.8	3.3	10.8	2.5	1.3
7.0	82.7	154.7	23.2	67.1	3.4	4.5
8.0	101.1	174.6	25.2	119.7	3.8	7.9
9.0	78.0	18.7	1.9	9.1	2.2	1.2
10.0	72.1	11.9	1.3	8.3	2.4	0.9
11.0	115.5	14.9	2.2	11.1	2.8	1.4
12.0	100.9	41.3	12.7	28.6	2.8	3.3
13.0	76.4	81.6	11.9	29.5	2.7	5.9
14.0	71.7	73.3	8.0	24.2	2.5	7.5
15.0	68.6	73.0	10.8	26.6	2.5	6.4
16.0	75.7	77.0	9.8	26.4	2.6	7.0
17.0	114.9	153.0	21.7	58.8	3.1	7.3
18.0	72.8	75.0	9.8	26.9	2.4	7.1
19.0	111.8	91.0	10.7	30.1	2.9	6.1
20.0	75.4	86.3	11.4	28.5	2.7	5.1



**Bijlage III** Gemiddelde concentraties (n=4) van gemeten parameters in het bodemvocht in  $\mu\text{mol/l}$  op drie tijdstippen gedurende het experiment, inclusief de SEM gegeven tussen haakjes.

<b>P</b>	<b>T=1</b>	<b>T=4</b>	<b>T=8</b>
veen, permanent onder water	31,4 (5,1)	15,7 (3,2)	13,5 (2,9)
klei, permanent onder water	18,1 (2,9)	20,1 (5,4)	17,5 (4,0)
veen, droogval	31,3 (2,2)	2,6 (0,6)	2,7 (1,5)
klei, droogval	15,2 (6,8)	1,4 (0,4)	0,6 (0,2)
<b>Ca</b>	<b>T=1</b>	<b>T=4</b>	<b>T=8</b>
veen, permanent onder water	1189 (39)	1379 (39)	1549 (40)
klei, permanent onder water	1346 (23)	1477 (26)	1769 (33)
veen, droogval	1205 (34)	3535 (54)	2263 (172)
klei, droogval	1885 (60)	5254 (550)	2780 (250)
<b>NO<sub>3</sub></b>	<b>T=1</b>	<b>T=4</b>	<b>T=8</b>
veen, permanent onder water	0,7 (0,1)	48,2 (6,8)	8,7 (1,6)
klei, permanent onder water	3,0 (2,1)	22,9 (10,4)	12,9 (4,9)
veen, droogval	11,2 (5,0)	391,7 (47,7)	12,0 (2,9)
klei, droogval	46,9 (21,5)	40,7 (19,7)	13,1 (1,4)
<b>NH<sub>4</sub></b>	<b>T=1</b>	<b>T=4</b>	<b>T=8</b>
veen, permanent onder water	210,8 (19,8)	87,3 (17,0)	13,8 (4,2)
klei, permanent onder water	172,8 (15,6)	51,8 (16,4)	33,2 (5,6)
veen, droogval	314,5 (19,0)	12,2 (3,6)	4,2 (1,4)
klei, droogval	170,8 (29,3)	3,3 (0,3)	8,8 (1,4)
<b>pH</b>	<b>T=1</b>	<b>T=4</b>	<b>T=8</b>
veen, permanent onder water	7,38 (0,01)	7,28 (0,02)	7,33 (0,03)
klei, permanent onder water	7,49 (0,05)	7,32 (0,06)	7,34 (0,02)
veen, droogval	7,49 (0,02)	7,11 (0,13)	7,12 (0,08)
klei, droogval	7,58 (0,03)	7,35 (0,11)	7,33 (0,04)
<b>S</b>	<b>T=1</b>	<b>T=4</b>	<b>T=8</b>
veen, permanent onder water	681 (33)	1082 (34)	1511 (49)
klei, permanent onder water	827 (21)	1199 (50)	1589 (49)
veen, droogval	501 (46)	3980 (148)	2586 (316)
klei, droogval	1186 (169)	6168 (698)	2969 (317)

**Bijlage IV** Gemiddelde (n=4) concentratie van fosfor en stikstof in het oppervlaktewater op zes tijdstippen gedurende het droogval experiment. De concentraties zijn gegeven in  $\mu\text{mol/L}$ , de nalevering is gegeven in  $\text{mg/m}_2/\text{dag}$ . De SEM is weergegeven tussen haakjes achter de getallen.

P	T=1	T=2	T=4	T=5	T=7	T=8
veen, permanent onder water	2,74 (0,40)	4,12 (0,35)	3,51 (0,41)	2,52 (0,35)	1,52 (0,13)	1,1 (0,21)
klei, permanent onder water	0,06 (0,05)	0,22 (0,11)	0,65 (0,15)	0,4 (0,05)	0,29 (0,05)	0,33 (0,05)
veen, droogval				0,33 (0,14)	0,37 (0,06)	0,27 (0,05)
klei, droogval				0,36 (0,10)	0,2 (0,05)	0,15 (0,04)
N	T=1	T=2	T=4	T=5	T=7	T=8
veen, permanent onder water	77,79 (3,55)	114,84 (3,60)	156,74 (4,00)	119,12 (2,69)	72,54 (5,64)	46,81 (4,27)
klei, permanent onder water	68,43 (5,11)	87,46 (1,46)	82,27 (8,43)	64,18 (6,58)	47,42 (5,45)	34,54 (4,38)
veen, droogval				14,01 (2,18)	31,71 (1,86)	26,98 (2,47)
klei, droogval				8,69 (0,40)	24,08 (1,69)	22,51 (1,56)

P	Nalevering
veen, permanent onder water	- 53,3 (8,0)
klei, permanent onder water	4,3 (0,6)
veen, droogval	- 2,4 (8,9)
klei, droogval	- 11,2 (6,6)
N	Nalevering
veen, permanent onder water	- 441,3 (46,7)
klei, permanent onder water	- 431,4 (33,5)
veen, droogval	353,1 (99,2)
klei, droogval	358,3 (41,3)

